

**MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE  
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI  
FACULTATEA DE INGINERIE MECANICĂ ȘI ELECTRICĂ**

**TEZĂ DE DOCTORAT**

**~REZUMAT~**

**SISTEM EXPERT NEURO-FUZZY PENTRU  
CONTROLUL PROCESELOR DE EPURARE  
A APELOR UZATE**

**Conducător științific,  
Prof. Dr. Ing. Mihaela Oprea**

**Doctorand,  
Mat. Cărbureanu Mădălina**

**2014**

## CUPRINSUL TEZEI DE DOCTORAT

Lista figurilor	5
Lista tabelelor	7
Lista acronimelor	10
Introducere	11
<b>Capitolul 1. Epurarea apelor uzate</b>	14
1.1. Elemente introductive	14
1.2. Procese și procedee de epurare a apelor uzate	17
1.3. Structura unui sistem automat de epurare a apelor uzate	24
1.4. Studiu de caz: procesul de neutralizare a pH-ului	27
1.5. Concluzii parțiale	30
<b>Capitolul 2. Stadiul actual și tendințe în domeniul controlului proceselor de epurare a apelor uzate</b>	32
2.1. Controlul proceselor de epurare	33
2.2. Metode convenționale de control	35
2.2.1. Algoritm PID	35
2.2.2. Algoritm PID cu adaptare programată	37
2.3. Metode avansate de control	38
2.3.1. Metode neuronale	39
2.3.2. Metode fuzzy	41
2.3.3. Metode neuro-fuzzy	44
2.3.4. Metode bazate pe cunoștințe	46
2.4. Sisteme de control al proceselor de epurare a apelor uzate	50
2.4.1. Sisteme dezvoltate pe plan național	50
2.4.2. Sisteme dezvoltate pe plan internațional	54
2.4.3. Analiza performanțelor sistemelor de control al proceselor de epurare	58
2.5. Tendințe în domeniul controlului proceselor de epurare a apelor uzate	62
2.6. Modele ale procesului de neutralizare a pH-ului	64
2.7. Concluzii parțiale	71
<b>Capitolul 3. Cercetări privind dezvoltarea unor sisteme automate pentru controlul pH-ului apei uzate</b>	73
3.1. Sistemul propus pentru controlul automat al pH-ului apei uzate	74
3.2. Studiu de caz: procesul de neutralizare a pH-ului apei uzate aferent unei stații industriale	75
3.3. Determinarea pe cale experimentală a variației pH în procesul de neutralizare a apelor uzate	78
3.4. Validarea modelului procesului de neutralizare pentru o stație industrială de epurare a apelor uzate	81
3.5. Sistemul SRAPHPID	88
3.5.1. Descrierea sistemului	89
3.5.2. Rezultate ale simulărilor	90
3.6. Sistemul FuzzypHControl	92

3.6.1. Descrierea sistemului	92
3.6.2. Rezultate ale simulărilor	95
3.7. Sistemul ANFISpHControl	97
3.7.1. Descrierea sistemului	97
3.7.2. Rezultate ale simulărilor	100
3.8. Sistemul SEpHControl	102
3.8.1. Descrierea sistemului	102
3.8.2. Rezultate ale simulărilor	104
3.9. Sistemul RNApHControl	105
3.9.1. Descrierea sistemului	106
3.9.2. Rezultate ale simulărilor	108
3.10. Studiul comparativ al sistemele dezvoltate	110
3.11. Controlul inteligent al pH-ului prin utilizarea sistemelor adaptive neuro-fuzzy	113
3.12. Concluzii parțiale	118
<b>Capitolul 4. Contribuții la dezvoltarea unui sistem expert neuro-fuzzy pentru controlul pH-ului apei uzate</b>	121
4.1. Sistemul DMpHCTRL pentru controlul pH-ului, bazat pe tehnici de data mining	122
4.1.1. Determinarea setului de reguli prin utilizarea unei tehnici de data mining	123
4.1.2. Dezvoltarea sistemului	125
4.1.3. Rezultate ale simulărilor	126
4.2. Sistemul expert neuro-fuzzy SENFpHCTRL pentru controlul automat al pH-ului	127
4.2.1. Arhitectura sistemului	128
4.2.2. Realizarea sistemului fizic și a componentei software	131
4.2.3. Testarea componentei software din sistem prin simularea traductorului și a elementelor de execuție	132
4.2.4. Implementarea sistemului SENFpHCTRL pe bază de microcontroller	136
4.2.5. Completarea bazei de cunoștințe a sistemului și dezvoltarea motorului de inferență	140
4.2.6. Rezultate experimentale furnizate de sistemul SENFpHCTRL	150
4.3. Concluzii parțiale	156
<b>Capitolul 5. Contribuții la dezvoltarea unui sistem expert neuro-fuzzy pentru controlul proceselor de epurare a apelor uzate</b>	160
5.1. Analiza componentelor principale – studiu de caz stație de epurare industrială	160
5.2. Modele de predicție numerică a parametrilor adiționali – studiu de caz stație de epurare industrială	165
5.3. Completarea sistemului expert asociat SENFpHCTRL cu un set de cunoștințe euristice pentru parametrii adiționali	168
5.4. Prezentarea interfeței grafice a sistemului SENFpHCTRL	171

5.5. Concluzii parțiale	176
<b>Capitolul 6. Concluzii finale, sinteză a contribuțiilor și direcții viitoare de cercetare</b>	178
<b>Lista lucrărilor publicate</b>	184
<b>Bibliografie</b>	187
<b>Webografie</b>	194
<b>Anexe</b>	
<b>Anexa 1.</b> Parametrul de calitate pH, caracteristici statice proces neutralizare pH și elemente de execuție aferente treptelor SEAU	197
<b>Anexa 2.</b> Buletin analiză probe, experimente determinare variație pH	199
<b>Anexa 3.</b> Date antrenare, validare, model, Rule Viewer ANFIS, fișierul training.dat și fișierele .data, .names, set reguli DMpHCTRL	200
<b>Anexa 4.</b> Baza de reguli dezvoltată pentru domeniul pH-ului acid și domeniul pH-ului bazic și reguli parametri adiționali	205
<b>Anexa 5.</b> Cod sursă DMpHCTRL, cod sursă fișier fismain.c (SENFpHCTRL - formă inițială) și selecție cod sursă fișier fismain.c, <i>cu evidențierea modificărilor și completărilor efectuate de autor</i> (SENFpHCTRL hardware - forma finală)	212
<b>Anexa 6.</b> Implementare Simulink model proces neutralizare pH, arhitectura sistemelor dezvoltate	236
<b>Anexa 7.</b> Simulări determinare caracteristici statice ale procesului în zona neutralizării unui pH bazic și a unui pH acid	242
<b>Anexa 8.</b> Parametrii de acordare ajustați SRaHPID	243
<b>Anexa 9.</b> Reprezentare funcții apartenență asociate intrării și ieșirii RpHFuzzy și fereastră vizualizare reguli	244
<b>Anexa 10.</b> Domeniu valori posibile și reguli euristice SEpHControl	245
<b>Anexa 11.</b> Parametri, interfață nntaintool, antrenare și validare RNA	246
<b>Anexa 12.</b> Detalii proiectare regulator ANFIS pentru control inteligent pH apă uzată	247
<b>Anexa 13.</b> Microcontroller Marvell 88F6281, pași compilare sistem operare UNIX BSD, debit pompe utilizate	248
<b>Anexa 14.</b> Setul complet al condițiilor legate de intervalul de pH măsurat, de timpul estimat și de comanda elaborată de ANFIS	250
<b>Anexa 15.</b> Selecție date experimentale (mediere pH măsurat), capturi ecran experimente SENFpHCTRL	252
<b>Anexa 16.</b> Sistemul hardware SENFpHCTRL	256

**Cuvinte cheie:** sistem expert neuro-fuzzy, controlul proceselor de epurare, neutralizare pH, sistem automat, inteligență artificială

## REZUMAT

Procesele din stațiile de epurare a apelor uzate sunt extrem de variate (neutralizare, coagulare, oxidare, reducere, precipitare), dinamice, neliniare (puternic neliniare) și complexe, interacționând strâns unele cu altele. Dintre toate procesele de epurare, cel mai important din punct de vedere al influenței asupra celorlalte procese – în special asupra celor din treapta chimică și biologică – este procesul de neutralizare a pH-ului apei uzate. Tehnologia din spatele proceselor de epurare, în special de neutralizare a pH-ului, este perfecționată continuu pentru noi standarde de calitate și noi cerințe de minimizare a energiei consumate, dar și din punctul de vedere al eficienței de funcționare: tehnici de ultimă generație atât de construcție (hardware), cât și de programare (software), consum redus de reactanți, adaptarea pentru diferite procese cu costuri minime. Un factor important în dezvoltarea sistemelor de epurare constă în normativele tehnice de protecție a apelor care sunt din ce în ce mai restrictive.

Controlul proceselor de epurare puternic neliniare prin metode convenționale (algoritmii PID și Gain-Scheduling PID) este dificil de realizat, presupunând un consum nejustificat de resurse. În cazul procesului de neutralizare a pH-ului apei uzate, în jurul punctului de echivalență ar fi necesar un sistem de calcul adițional foarte rapid, cu o capacitate de memorie extrem de mare, pentru a determina tripletele ( $K_R$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ) pentru mai multe subdomenii ale pH și transferul acestora în regulatorul fizic.

În aceste condiții, o posibilă soluție o reprezintă utilizarea tehnicilor de inteligență artificială (sisteme adaptive neuro-fuzzy, sisteme expert, logică fuzzy, rețele neuronale artificiale) în controlul unor astfel de procese puternic neliniare.

Lucrarea de față este orientată în domeniul epurării apelor uzate la nivel de treaptă chimică și **propune un sistem expert neuro-fuzzy SENFpHCTRL pentru controlul proceselor de epurare a apelor uzate, implementat atât la nivel de calculator PC, cât și la nivel de microcontroller de ultimă generație.**

**Obiectivul principal al cercetării doctorale:** dezvoltarea unui sistem expert neuro-fuzzy pentru controlul automat al proceselor de epurare a apelor uzate.

**Obiectivele specifice ale studiului doctoral au vizat:**

- analiza metodelor convenționale și avansate de control;
- analiza sistemelor dezvoltate pe plan național și internațional;
- studiul modelelor proceselor de epurare a apelor uzate;
- determinarea pe cale experimentală a caracteristicilor statice ale procesului de neutralizare pH apă uzată;
- validarea modelului procesului de neutralizare pH pentru stația industrială studiată;
- identificarea celei mai potrivite metode de control (convențională sau IA) a procesului de neutralizare pH;
- dezvoltarea componentei software (ANFIS, SE) și implementarea fizică a sistemului SENFpHCTRL pentru controlul automat al pH-ului apei uzate;
- realizarea unui set de experimente în laboratorul mobil Mud Logging al Companiei Rompetrol S.A;
- extinderea SENFpHCTRL pentru controlul unor parametri adiționali.

**Principalele contribuții ale tezei sunt:**

- analiza evoluției pH-ului între diferite puncte ale curbelor de titrare, în funcție de concentrațiile reactivilor; rezultatele obținute au fost diseminate în lucrarea [25];
- validarea modelului procesului de neutralizare a pH-ului preluat din literatura de specialitate, pentru stația industrială de epurare studiată; rezultatele obținute au fost diseminate în lucrarea [26];
- identificarea celei mai potrivite metode de IA (sistemele adaptive neuro-fuzzy) pentru construirea unor regulatoare care să funcționeze pe întreg domeniul pH-ului; un astfel de regulator a fost implementat ca sistem fizic în capitolele 4 și 5;
- implementarea software a unui regulator ANFIS la nivelul unui microcontroller (subcapitolul 3.11), prin realizarea practică a metodei de extracție a ANFIS dintr-un mediu MATLAB lansat în memorie, teoretizată în lucrarea [10];

- dezvoltarea unui sistem expert care intervine asupra comenzii ANFIS în prealabil elaborată pentru debitul  $F_2$ , atât în afara, cât și în jurul punctului de echivalență;
- dezvoltarea și implementarea (pe bază de PC și microcontroller) a sistemului expert neuro-fuzzy SENFpHCTRL pentru controlul automat al pH-ului apelor uzate; rezultatele furnizate de SENFpHCTRL (cu/fără MI) au fost diseminate în lucrarea [26];
- realizarea unor experimente (neutralizare pH acid/bazic) folosind sistemul prototip SENFpHCTRL în cadrul laboratorului de Mud Logging al companiei Rompetrol S.A;
- extinderea sistemului SENFpHCTRL (capitolul 5) cu o serie de subrutine (set nou de reguli, funcții, cod C) pentru lucrul cu parametri adiționali (MTS, extractibile, CBO, CCO, fenoli, cloruri) din procesele aferente treptei chimice a SEAU;
- determinarea unui set de modele de predicție numerică a parametrilor adiționali;
- completarea sistemului SENFpHCTRL cu o interfață grafică specifică microcontrollerelor cu terminale-text.

Teza de doctorat este structurată în 6 capitole, după cum urmează.

**Capitolul 1** este o scurtă introducere în domeniul apelor uzate, fiind prezentate o serie de noțiuni de bază, procese și procedee de epurare, cu accent pe procesul de neutralizare a pH-ului. De asemenea, s-a realizat o sinteză a parametrilor monitorizați, controlați, a elementelor de execuție și a agenților de reglare pentru fiecare dintre cele trei trepte de epurare, propunându-se în același timp și schema bloc pentru o stație de epurare a apelor uzate, precum și structura unui sistem automat de epurare.

**Capitolul 2** expune studiul efectuat asupra literaturii de specialitate în domeniul controlului proceselor de epurare a apelor uzate, prezentându-se metodele convenționale și avansate (ce au la bază tehnici ale inteligenței artificiale) de control, sistemele dezvoltate pe plan național și internațional pentru controlul proceselor de epurare pentru care s-a realizat o analiză a performanțelor. De asemenea, sunt prezentate tendințele în domeniul controlului proceselor de epurare, funcție de care a fost propusă schema bloc a unui regulator hardware atașat unui proces de epurare, precum și prezentarea unor modele matematice ale procesului de neutralizare a pH-ului.

**Capitolul 3** prezintă o serie de contribuții ale lucrării de față, precum și cercetările efectuate de autor pentru dezvoltarea de sisteme automate destinate controlului pH-ului apelor uzate. S-au efectuat o serie de experimente practice de neutralizare a pH-ului pentru determinarea caracteristicilor statice ale procesului și totodată pentru obținerea de cunoștințe euristice necesare implementării fizice a unui regulator hardware. A fost validat un model preluat din literatura de specialitate și simulat în mediul MATLAB, prin compararea rezultatelor practice (obținute prin testele realizate în stația industrială studiată) cu răspunsul procesului simulat.

Autorul a dezvoltat la nivel de simulare o serie de sisteme de control automat (folosind algoritmul PID, logica fuzzy, sistemele adaptive neuro-fuzzy, sistemele expert, rețelele neuronale artificiale) cu scopul de a identifica, printr-un studiu comparativ al acestor sisteme, cea tehnică de inteligență artificială cea mai potrivită în construirea unui regulator hardware destinat procesului de neutralizare a pH-ului.

**Capitolul 4** prezintă contribuțiile autorului la dezvoltarea unui sistem expert neuro-fuzzy pentru controlul pH-ului apei uzate SENFpHCTRL, acestea constând în:

- dezvoltarea unui sistem (DMpHCTRL) pentru stabilirea dozării de reactanți, având funcționarea pe baza tehnicilor de data-mining;
- dezvoltarea sistemului expert neuro-fuzzy pentru controlul automat al pH-ului apelor uzate (SENFpHCTRL), pentru care:
  - a fost propusă schema bloc a sistemului, precum și două arhitecturi la nivel software atât pentru funcționarea pe bază de sistem adaptiv neuro-fuzzy dezvoltat în capitolul 3, cât și pentru funcționarea hibridă, sistem adaptiv neuro-fuzzy combinat cu un sistem expert;
  - dezvoltarea bazei de cunoștințe și a motorului de inferență deductiv, respectiv a sistemului expert utilizat în aplicarea unui factor de corecție asupra comenzii elaborate de sistemul adaptiv neuro-fuzzy;
  - sistemul fizic împreună cu componenta software au fost dezvoltate sub un sistem de operare certificat industrial, atât la nivel de calculator PC, cât și la nivel de microcontroller performant de ultimă generație;
  - pe parcursul dezvoltării, sistemul a fost testat cu traductoare și elemente de execuție atât sub formă simulată, cât și cu echipamente profesionale puse la dispoziție de



departamentul de Automatică, Calculatoare și Electronică (ACE), precum și de compania Rompetrol S.A.;

○ experimentele au fost efectuate în laboratorul de Mud Logging al companiei Rompetrol S.A.

În **capitolul 5** este prezentată extinderea sistemului expert neuro-fuzzy SENFpHCTRL dezvoltat inițial pentru controlul pH-ului apei uzate, pentru controlul în regim de avertizare a unor parametri adiționali:

- prin intermediul analizei în componente principale și a regresiei liniare au fost determinați parametrii reprezentativi din treapta chimică și biologică a stației industriale studiate, precum și modelele de predicție numerică aferente acestora;

- baza de cunoștințe a sistemului expert (dezvoltat inițial doar pentru procesul de control a pH-ului) și motorul de inferență au fost completate cu un set de cunoștințe euristice pentru setul de parametri adiționali obținuți;

- este prezentată interfața grafică cu utilizatorul a sistemului SENFpHCTRL (a regulatorului hardware) dezvoltat de autor.

Ultimul capitol (**capitolul 6**) prezintă concluziile finale ale tezei, subliniind atât contribuțiile aduse în lucrare, cât și direcțiile viitoare de cercetare.

# Abstract of Doctoral Thesis

## NEURO-FUZZY EXPERT SYSTEM FOR WASTEWATER TREATMENT PROCESSES CONTROL

Doctoral student:

Math. Cărbureanu Mădălina

Doctoral adviser:

Prof. Dr. Eng. Oprea Mihaela

### TABLE OF CONTENTS

Lists of figures	5
Lists of tables	7
Lists of acronyms	10
Introduction	11
<b>Chapter 1. Wastewater treatment</b>	14
1.1. Introductory elements	14
1.2. Processes and procedures for wastewater treatment	17
1.3. The structure of a wastewater treatment automatic system	24
1.4. Case study: pH neutralization process	27
1.5. Chapter conclusions	30
<b>Chapter 2. State of the art and trends in the control of wastewater treatment processes domain</b>	32
2.1. Wastewater processes control	33
2.2. Conventional methods of control	35
2.2.1. PID algorithm	35
2.2.2. Gain Scheduling PID	37
2.3. Advanced control methods	38
2.3.1. Neural methods	39
2.3.2. Fuzzy logic methods	41
2.3.3. Neuro-fuzzy methods	44
2.3.4. Knowledge based methods	46
2.4. Control systems for wastewater treatment processes	50
2.4.1. Systems developed nationally	50

2.4.2. Systems developed internationally	54
2.4.3. Performances analysis of the treatment processes control systems	58
2.5. Trends in control of wastewater treatment processes	62
2.6. pH neutralization process models	64
2.7. Chapter conclusions	71
<b>Chapter 3. Research on development of automatic systems for wastewater pH control</b>	73
3.1. The proposed system for wastewater pH automatic control	74
3.2. Case study: the wastewater pH neutralization process from an industrial plant	75
3.3. Experimental determination of pH variation in wastewater neutralization process	78
3.4. Validation of the neutralization process model for a wastewater treatment industrial plant	81
3.5. SRApHPID system	88
3.5.1. System description	89
3.5.2. Results of simulations	90
3.6. FuzzypHControl system	92
3.6.1. System description	92
3.6.2. Results of simulations	95
3.7. ANFISpHControl system	97
3.7.1. System description	97
3.7.2. Results of simulations	100
3.8. SEpHControl system	102
3.8.1. System description	102
3.8.2. Results of simulations	104
3.9. RNApHControl system	105
3.9.1. System description	106
3.9.2. Results of simulations	108
3.10. Comparative study of the developed systems	110
3.11. Intelligent control of pH using neuro-fuzzy adaptive systems	113
3.12. Chapter conclusions	118
<b>Chapter 4. Contributions to the development of a neuro-fuzzy expert system for wastewater pH control</b>	121
4.1. DMpHCTRL system for pH control, based on data mining techniques	122
4.1.1. Determining the set of rules by using data mining techniques	123
4.1.2. System development	125
4.1.3. Results of simulations	126
4.2. SENFpHCTRL neuro-fuzzy expert system for pH automatic control	127
4.2.1. System architecture	128
4.2.2. Development of the physical system and the software component	131
4.2.3. Testing the system software component by simulating the sensor and actuators	132

4.2.4. SENFpHCTRL system implementation on microcontroller	136
4.2.5. System knowledge base addition and inference engine development	140
4.2.6. SENFpHCTRL experimental results	150
4.3. Chapter conclusions	156
<b>Chapter 5. Contributions to the development of a neuro-fuzzy expert system for wastewater treatment processes control</b>	160
5.1. Principal component analysis – industrial treatment plant case study	160
5.2. Numerical prediction models for additional parameters - industrial treatment plant case study	165
5.3. Adding the expert system of SENFpHCTRL with a set of heuristic knowledge for additional parameters	168
5.4. Presentation of the SENFpHCTRL system user interface	171
5.5. Chapter conclusions	176
<b>Chapter 6. Conclusions, contributions and future work</b>	178
<b>Publication list</b>	184
<b>Bibliography</b>	187
<b>Webography</b>	194
<b>Appendixes</b>	
<b>Appendix 1.</b> Quality parameter pH, pH neutralization process static characteristics and associated actuators for wastewater treatment plant steps	197
<b>Appendix 2.</b> Sample analysis bulletin, experiments of determining pH variation	199
<b>Appendix 3.</b> Training data, validation, model, Rule Viewer ANFIS, training.dat file and .data, .names files, DMpHCTRL set of rules	200
<b>Appendix 4.</b> Rule base developed for acid and alkaline pH domain and additional parameters rules	205
<b>Appendix 5.</b> DMpHCTRL source code, source code fismain.c file (SENFpHCTRL - original form) and <u>source code selection fismain.c file, highlighting changes and additions made by the author (SENFpHCTRL hardware - the final form)</u>	212
<b>Appendix 6.</b> Implementation in Simulink of pH neutralization process model, the developed systems architecture	236
<b>Appendix 7.</b> Simulations for determining the process static characteristics in the acid and alkaline pH neutralization domain	242
<b>Appendix 8.</b> SRAPHPID adjusted tuning parameters	243
<b>Appendix 9.</b> Representation of RpHFuzzy input and output membership functions and Rule Viewer	244
<b>Appendix 10.</b> Range of possible values and heuristic rules SEpHControl	245
<b>Appendix 11.</b> Parameters, nstraintool interface, RNA training and validation	246
<b>Appendix 12.</b> Details ANFIS controller design for wastewater pH intelligent control	247
<b>Appendix 13.</b> Marvell 88F6281 microcontroller, UNIX BSD compilation system steps, used pumps flow rate	248

<b>Appendix 14.</b> The full set of conditions related to the measured pH range, the estimated time and the command supplied by ANFIS	250
<b>Appendix 15.</b> Selection of experimental data (measured pH mediation), screenshots of the SENFpHCTRL experiments achieved in Mud Logging mobile laboratory from Rompetrol S.A. Company	252
<b>Appendix 16.</b> SENFpHCTRL hardware system	256

**Keywords:** neuro-fuzzy expert system, treatment processes control, pH neutralization, automatic system, artificial intelligence

## ABSTRACT

The processes from wastewater treatment plants are diverse (neutralization, coagulation, oxidation, reduction, precipitation), dynamic, nonlinear (highly non-linear) and complex, interacting closely with each other.

From all the treatment processes, the most important in terms of influence on other processes - especially on those from chemical and biological stage - is the neutralization of wastewater pH.

The technology behind wastewater treatment processes, especially the pH neutralization process, is continuously improved for new quality standards and new requirements in order to minimize the energy consumption, but also in terms of operating efficiency: the latest hardware and software technologies, low consumption of reagents and adaptation to different processes with minimal costs. An important factor in the development of treatment systems is the technical standards for water protection that are becoming more stringent.

Strongly nonlinear process control treatment by conventional methods (algorithms PID and PID Gain-Scheduling) is difficult, assuming an unjustified consumption of resources. In the case of wastewater pH neutralization process, around the equivalence point it is necessary an additional computing system, with a very large memory capacity to determine triples ( $K_R$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ) for many subfields of pH and their transfer into the hardware controller.

In these circumstances, a possible solution is to use artificial intelligence techniques (adaptive neuro-fuzzy systems, expert systems, fuzzy logic and artificial neural networks) in control of such highly non-linear processes.

This doctoral thesis is orientated in wastewater treatment domain at chemical step level and it **proposes a neuro-fuzzy expert system SENFpHCTRL for wastewater treatment processes control, implemented at PC and microcontroller level.**

**The main objective of the doctoral research:** the development of a neuro-fuzzy expert system for automatic control of wastewater treatment processes.

**The main specific objectives were:**

- analysis of conventional and advanced control methods;
- analysis of systems developed nationally and internationally;
- the study of the wastewater treatment processes models;
- the experimental determination of the static characteristics of wastewater pH neutralization process;
- the validation of pH neutralization process model for a studied wastewater treatment plant;
- the identification of the most adequate control method (conventional or artificial intelligence) for pH neutralization process;
- the developing of SENFpHCTRL software component (ANFIS, SE) and physical implementation of SENFpHCTRL system for wastewater pH automatic control;
- the achieving of a set of experiments using SENFpHCTRL prototype system in the Mud Logging mobile laboratory of Rompetrol S.A. Company;
- SENFpHCTRL extension for the control of additional parameters.

**The main thesis contributions are:**

- the analysis of the pH evolution between different points of the titration curves, depending on the concentrations of reagents; results were disseminated in paper [25];

- the validation of pH neutralization process model for the studied treatment industrial plant; results were disseminated in [26];
- the identification of the most suitable method of IA (adaptive neuro-fuzzy systems) for building controllers that operate on the entire pH domain; such a controller was implemented at hardware level in chapters 4 and 5;
- the software implementation of an ANFIS controller at microcontroller level (section 3.11), by carrying out the method of extraction of ANFIS from MATLAB environment launched in memory, theorized in [10];
- the development of an expert system that adjusts (applies a correction factor) the ANFIS command (for F<sub>2</sub> flow rate control), both outside and around the equivalence point;
- the development and implementation (on PC and microcontroller) of the neuro-fuzzy expert system SENFpHCTRL for wastewater pH control; the results provided by SENFpHCTRL (with / without inference engine) were disseminated in [26];
- the performing of a set of experiments (acid and alkaline pH neutralization) using SENFpHCTRL prototype system in the Mud Logging laboratory of Rompetrol S.A Company;
- expanding SENFpHCTRL system (Chapter 5) with a series of subroutines (new set of rules, functions, code C) for additional parameters (MTS, extractions, BOD, COD, phenols, chlorides) from a plant chemical step;
- determining a set of numerical prediction models for additional parameters;
- the SENFpHCTRL system adding with a graphical interface specific to the microcontrollers with text terminals.

The thesis is divided into six chapters, as follows.

**Chapter 1** is a brief introduction to the field of wastewater, being presented a number of key concepts, processes and methods of treatment, focusing on pH neutralizing process. It was also made a summary of the monitored and controlled parameters, actuators and control agents for each of the three stages of treatment, in the same time being proposed the block diagram for a wastewater treatment plant and the structure of an automatic treatment system.

**Chapter 2** exposes the study made on the literature in the wastewater treatment processes control domain, being presented the conventional and advanced control methods (which are based on artificial intelligence techniques), the systems developed nationally and internationally for treatment processes control for which an analysis of performance was made. Also, are presented the trends in the treatment processes control, depending on which was proposed the block diagram of a hardware controller attached to a treatment process, and also was presented a set of mathematical models for pH neutralization process.

**Chapter 3** presents a number of contributions of this thesis and also the research conducted by the author for the development of automatic systems for wastewater pH control. Were achieved a series of practical experiments for pH neutralization to determine the static characteristics of the process and also for obtaining the heuristic knowledge necessary for the physical implementation of the hardware controller. It was validated a model taken from literature and simulated in MATLAB environment, by comparing the practical results (obtained from tests achieved in the industrial studied plant) with the simulated process response.

The author has developed, at simulation level, a number of automatic control systems (using PID algorithm, fuzzy logic, adaptive neuro-fuzzy systems, expert systems and artificial neural networks) in order to identify, through a comparative study of these systems, that artificial intelligence technique best suited to build a hardware controller for pH neutralization process.

**Chapter 4** presents the author's contributions to the development of a neuro-fuzzy expert system for the wastewater pH control SENFpHCTRL, which consists in:

- developing a system (DMpHCTRL) to establish dosage of reactants, with operation based on data-mining techniques;
- the development of the neuro-fuzzy expert system for wastewater pH automatic control (SENFpHCTRL), for which :
  - was proposed the system block diagram and two software architectures for the operation based on adaptive neuro-fuzzy system developed in chapter 3 and also for the hybrid operation, adaptive neuro-fuzzy system combined with an expert system;



- the development of the knowledge base and deductive inference engine, respectively the development of the expert system used to apply a correction factor to the command elaborated by the adaptive neuro-fuzzy system;
- the physical system with the software component were developed under a certified industrial operating system, at both the PC and microcontroller level;
- during the development, the system has been tested with simulated sensors and actuators and also with professional equipments provided by the Department of Automation, Computers and Electronics (ACE) and by Rompetrol S.A. Company;
- the experiments using SENFpHCTRL prototype system were achieved in the Mud Logging laboratory from Rompetrol S.A. Company.

**Chapter 5** presents the extension of the neuro-fuzzy expert system SENFpHCTRL originally developed for wastewater pH control, for additional parameters control under warning regime:

- through principal component analysis and linear regression, were determined the representative parameters from chemical and biological steps of the studied industrial plant, and the related numerical prediction models;
- the expert system knowledge base (originally developed only for the control of pH) and the inference engine were added with a set of heuristic knowledge for the additional parameters;
- it was developed the SENFpHCTRL system (the hardware controller) graphical user interface.

The last chapter (**Chapter 6**) presents the thesis final conclusions, highlighting the author contributions and the future research directions.